海河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素分析

辛会超[1]，张安兵[1,2]，王贺封[1,2*]，马鹏飞[1]

（1. 河北工程大学 矿业与测绘工程学院，河北 邯郸 056038；2. 邯郸市自然资源空间信息重点实验室，河北 邯郸 056038）

摘要：为了揭示海河流域植被净初级生产力（net primary productivity，NPP）时空变化特征及其时空异质性的驱动机制，该文基于 MOD17A3HGF 数据集，综合自然和人为两个方面的影响因素，利用变异系数、趋势分析、相关分析、Hurst 指数以及地理探测器等研究方法，探讨了 2000—2020 年海河流域植被 NPP 时空格局演变特征和定量识别了驱动因素及其影响力。结果表明：（1）时间上，2000—2020 年期间海河流域植被 NPP 整体呈显著上升趋势，增速为 1.73 Tg C a^{-1}，年均 NPP 为 326.75 g C·m^{-2}·a^{-1}，其中针叶林、阔叶林、灌丛、草地和农用地的 NPP 多年均值分别为 313.59、385.28、353.03、320.12 和 295.22 g C·m^{-2}·a^{-1}。（2）空间上，NPP 高值区集中于西北部山区，低值区集中于东南部平原区；NPP 整体情况稳定，变异系数均值为 0.17；未来变化趋势呈反持续性，NPP 可能下降。（3）NPP 与气温呈负相关关系，与降水呈正相关关系，降水为主要气象因素；NPP 随着高程和坡度增加均呈“增加-减少”的变化趋势；耕地转草地使 NPP 增量最大，为 732.22×10^{-3} Tg C。（4）2000—2020 年期间，不同驱动因素影响力均值为 0.2，其中排序依次为降水＞高程＞坡度＞湿度＞气温＞日照时数＞土地利用＞风速。总体表明，研究期内海河流域植被 NPP 整体呈好转趋势；不同植被类型生产力存在差异，最强为阔叶林、灌丛；影响 NPP 空间分布的主导因素为降水、高程和坡度，人为因素的影响力低于自然因素。以上研究结果可为海河流域水土流失、植被退化等生态环境问题治理提供科学参考和决策依据。

关键词：净初级生产力，MOD17A3HGF，时空变化，驱动因素，海河流域

中图分类号：Q948　　　　　　　　**文献标识码**：A

Spatiotemporal variation of vegetation net primary productivity and its driving factors in the Haihe River Basin

XIN Huichao[1], ZHANG Anbing[1,2], WANG Hefeng[1,2*], MA Pengfei[1]

(1. *School of Mining and Geomatics, Hebei University of Engineering*, Handan 056038, Hebei, China; 2. *Key Laboratory of Natural Resources and Spatial Information*, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: To reveal the spatiotemporal variation characteristics of vegetation net primary productivity (NPP) in the Haihe River Basin and the driving mechanisms of its spatiotemporal heterogeneity. Based on MOD17A3HGF dataset, we studied the spatiotemporal pattern evolution characteristics of vegetation NPP in the Haihe River Basin from 2000 to 2020 using coefficient of variation, trend analysis, and Hurst index. Driving factors and their influence from natural and man-made aspects were also quantitatively explored for vegetation NPP variations using correlation analysis and the Geodetector model. The results were as follows: (1) The temporal variation of vegetation NPP in the Haihe River Basin presented a significant growth trend form 2000 to 2020, with a rate of 1.73 Tg C a^{-1}, and the annual average NPP was 326.75 g C·m^{-2}·a^{-1}; The average NPP of coniferous forests, broad-leaved forest, shrub, grassland and farmland were 313.59, 385.28, 353.03, 320.12 and 295.22 g C·m^{-2}·a^{-1}. (2) In terms of spatial distribution, the high-value areas of NPP were mainly located in the northwest mountains, and the low-value areas were mainly located in the southeast plain; The overall situation of NPP was relatively stable, with an average coefficient of variation of 0.17; The future trend of NPP is anti-continuity and it will

基金项目：国家自然科学基金（42071246）；河北省自然科学基金（E2020402006）；河北省高等学校科学技术研究重点项目（ZD2020312）[Supported by National Natural Science Foundation of China (42071246); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2020402006); Key Project of Educational Commission of Hebei Province of China (ZD2020312)]。

第一作者：辛会超（1995-），硕士研究生，主要从事流域生态遥感研究，（E-mail）1793547749@qq.com。

[*]**通信作者**：王贺封（1980-），博士，副教授，主要从事 GIS 与 RS 应用，城市地理数据挖掘研究，（E-mail）wanghefeng@hebeu.edu.cn。

decrease. (3) The correlation analysis showed that NPP was negatively correlated with temperature, and positively correlated with precipitation that was the main climate factor; NPP showed an “increase-decrease” trend with elevation and slope increasing; The conversion of farmland to grassland resulted in the largest increment of NPP at 732.22×10^{-3} Tg C. (4) From 2000 to 2020, the average influence value of different drivers was 0.2, and the order was precipitation > elevation > slope > humidity > temperature > sunshine duration > land use > wind speed. Overall, the results indicated that vegetation NPP in the Haihe River basin was improving during the study period; Productivity varied among different vegetation types, with the strongest being broad-leaf forest and shrubland; The dominant factors affecting the spatial distribution of NPP were precipitation, elevation and slope, and the influence of human factors was lower than that of natural factors. The results of above study can provide some scientific reference and decision basis for the treatment of ecological environment problems such as soil erosion and vegetation degradation in the Haihe River Basin.

Key words: net primary productivity(NPP), MOD17A3HGF, spatiotemporal variation, driving factors, Haihe River Basin

植被净初级生产力（net primary productivity，NPP）是指绿色植物在单位时间、单位面积内由光合作用产生的有机物总量扣除自养呼吸后的剩余部分（Field et al., 1998）。NPP 可作为陆地生态系统物质和能量交换的重要指标，其空间分布与区域气候、植被生长以及人类活动等因素息息相关，该指标的变化能反应植被群落的生产能力，是生态系统功能和结构变化的重要特征（朱文泉等，2007）。在“双碳”目标的大背景下，研究植被 NPP 时空变化特征及影响机制对于固碳增汇和生态修复治理工程等具有重要的意义。

NPP 的早期研究主要为站点实测和统计模拟，近年来，随着新型遥感科学技术与方法的快速发展，凭借实时性强、易于获取、覆盖范围广等优点，利用遥感数据进行模型准确估算已成为区域 NPP 监测和时空变化趋势分析的强有力手段，如采用 BIOME-BGC 模型（Sun et al., 2017）、CASA 模型（Liu et al., 2018）等。MOD17A3HGF 是利用 BIOME-BGC 模型及光能利用率模型模拟得到的全球生态系统植被 NPP 数据，该数据集已经在全球不同地区研究中得到应用与验证(Wang et al., 2021; Venter et al., 2021; Ge et al., 2021)。国内学者从不同空间尺度探讨了我国众多区域如秦巴山区(李金珂等，2019)、西辽流域(朱丽亚等，2020)、南方农牧交错带（赵唯茜等，2018）、青藏高原（陈舒婷等，2020）、山东省（骆艳和张松林，2019）、中国东南部(崔林丽等，2016）等 NPP 时空变化及驱动因素，均发现 NPP 与气温、降水有一定的相关性，但不同地区气象因子对 NPP 的影响力存在明显差异；当然，NPP 的时空异质性除了与气象因素的有关外，还受到地形、植被类型等其他自然因素（朱利欣和袁金国，2019；刘婧等，2021）和人为因素（袁甲等，2016；Ge et al., 2021）的影响。因此，区域尺度 NPP 时空异质性的驱动机制尚未完全清晰。

近年来，海河流域由于受气候变化、人为干扰等因素影响，生态系统十分脆弱，水土流失、植被退化等生态环境问题日益突出（杨艳丽，2017）。植被 NPP 作为判定区域生态系统变化及其可持续性的重要指标，而目前，关于该区域植被 NPP 的研究较少，现有大多数研究多集中于京津冀地区，且更多从单一因素考虑对植被 NPP 的影响。为此，本研究以海河流域为研究区，利用 2000—2020 年 MOD17A3HGF 数据集，结合气温、降水、地形和土地利用等数据，采用相关分析、趋势分析以及地理探测器等研究方法，通过对海河流域近 21 年期间植被 NPP 的时空格局动态演变特征以及从自然因素和人为因素对其变化的主要影响因素进行研究，拟探讨以下问题：（1）2000—2020 年海河流域植被 NPP 时空变化规律；（2）海河流域植被 NPP 未来可能的发展趋势；（3）定量识别海河流域植被 NPP 时空异质性驱动因素及其影响力。该研究在弥补海河流域当前研究不足的同时为该区域植被恢复治理、生态建设工程实施提供科学参考和决策依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

海河流域位于中国华北平原北部，112°—120°E、35°—43°N 之间（图 1：A），包括北京和天津两个直辖市、河北的大部分地区及山东、山西、辽宁、河南和内蒙古的部分地区，地势西北部高东南部低，气候类型为温带东亚季风气候（赵安周等，2019）。东部为平原区，地势较低。西部为山区，主要包括太行山脉和燕山山脉，地势较高。植被类型主要有阔叶林、针叶林、草地、灌丛、农用地，其占比分别约为 4.01%、

0.08%、40.61%、2.76%、52.54%（图 1：B）。由于海河流域坡度大、暴雨集中、土质疏松等自然因素和城市扩张等人为活动的强烈干扰，干旱、沙尘暴和水土流失等自然灾害严重，生态系统十分脆弱。

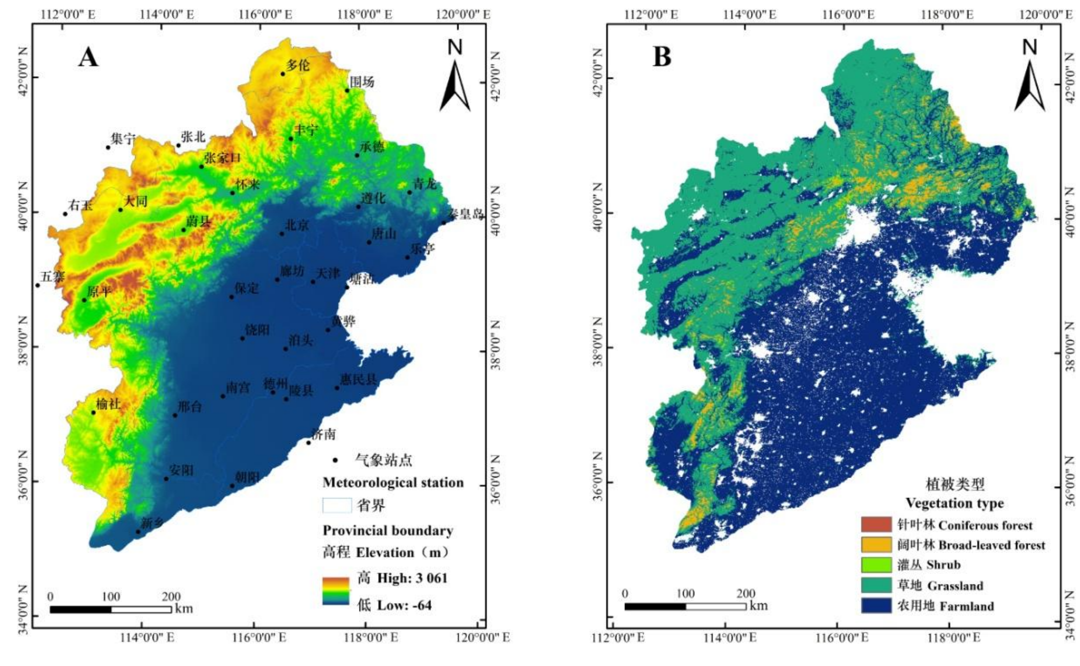


图 1 海河流域气象站点分布图和植被类型图（2019）

Fig.1 Meteorological station distribution map and vegetation type map (2019) of the Haihe River Basin

1.2 数据来源及处理

2000—2020 年植被 NPP 数据为美国国家宇航局 NASA（https://lpdaac.usgs.gov/）提供的 MOD17A3HGF 数据产品，该数据来自给定年份的所有 8 天净光合作用（net photosynthesis，PSN）产品 MOD17A2HGF 数据之和，空间分辨率为 500 m，时间分辨率为 1 a。结合产品说明，取数据集有效值为-3 000～32 700，范围以外的值以予剔除。气象数据选取中国气象数据网（https://data.cma.cn/）提供的 2000—2020 年海河流域及其周边 36 个气象站点的月均气温、月降水量、平均风速、日照时数以及平均相对湿度数据，利用反距离加权法（inverse distance weighted，IDW）将其插值为空间分辨率为 500 m 的栅格数据。DEM 数据为地理空间数据云（http://www.gscloud.cn/）提供的 SRTM 90 m 数据，坡度数据通过高程数据计算得到，根据研究区实际情况（申丽娜，2018），基于高程信息将研究区域划分为平原、丘陵、低山、中山、高山 5 类，坡度划分为微坡、缓坡、斜坡、陡坡、急坡 5 类。土地利用数据选取 2000 年、2010 年、2020 年 3 期 30 m 全球地表覆盖 Globeland30 数据，下载地址为 http://www.globallandcover.com/，植被类型数据源于 NASA 提供的 2000—2019 年 MCD12Q1 数据产品，空间分辨率为 500 m，时间分辨率为 1 a，根据产品数据说明，将土地利用和植被类型数据分别重分类为 6 类（耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地）、5 类（针叶林、阔叶林、灌丛、草地、农用地）。最后，将高程、坡度和土地利用等数据重采样为 500 m，使上述数据具有相同的像元大小。

2 研究方法

2.1 变异系数

采用变异系数对植被 *NPP* 随时间变化的稳定性进行分析（刘宪锋等，2015），计算公式如下：

$$C_V = \frac{1}{\overline{NPP}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(NPP_i - \overline{NPP})^2}{n-1}} \tag{1}$$

式中：C_V 为变异系数；C_V 值越小，表示 *NPP* 波动性越小，反之则越大；NPP_i 为第 i 年的 *NPP* 值；$\overline{NPP}$ 为海河流域 2000—2020 年 *NPP* 的平均值，n 为 21。

2.2 趋势分析

采用一元线性回归法对植被 *NPP* 的变化趋势进行分析（穆少杰等，2013），计算公式如下：

$$Slope=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times NPP_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}NPP_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-(\sum_{i=1}^{n}i)^2} \quad (2)$$

式中：*Slope* 为斜率，*Slope*＞0，表示 *NPP* 呈上升趋势，反之则下降；*n* 为 21；NPP_i 为第 *i* 年的 *NPP* 值。查 F 分布临界值表，将 *NPP* 变化趋势分为 5 类：极显著减少（*Slope*＜0，*P*＜0.01）、显著减少（*Slope*＜0，0.01≤*P*＜0.05）、变化不显著（*P*≥0.05）、显著增加（*Slope*＞0，0.01≤*P*＜0.05）、极显著增加（*Slope*＞0，*P*＜0.01）。

2.3 相关性分析

采用逐栅格空间分析法，探讨植被 *NPP* 与气温、降水之间的相关性（骆艳和张松林，2019），利用 *t* 检验法对结果进行显著性检验，计算公式如下：

$$R_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \qquad t=\frac{R_{xy}}{1-R_{xy}^2}\times\sqrt{n-m-3} \quad (3)$$

式中：R_{xy} 为相关系数；x_i 为第 *i* 年的 *NPP* 值；y_i 为第 *i* 年的气温或降水值；$\bar{x}$ 为 21 年间 *NPP* 平均值；$\bar{y}$ 为 21 年间气温或降水平均值；*m* 为控制变量个数；*n* 为样本数。

2.4Hurst 指数

利用 Hurst 指数探究研究区 *NPP* 的未来变化趋势（任涵玉等，2021），基本原理为假定一个 *NPP* 时间序列 NPP_t，对于任意正整数，则定义以下内容：

$$均值序列：\overline{NPP}_\tau=\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}NPP_\tau \qquad \tau=1,2,\cdots \quad (4)$$

$$累计离差：X(t,\tau)=\sum_{t=1}^{\tau}(NPP_t-\overline{NPP}_\tau) \qquad 1\leqslant t\leqslant\tau \quad (5)$$

$$极差：R(\tau)=\max_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau)-\min_{1\leqslant t\leqslant\tau}X(t,\tau) \qquad \tau=1,2,\cdots \quad (6)$$

$$标准差：S(\tau)=\left[\frac{1}{\tau}\sum_{t=1}^{\tau}(NPP_t-\overline{NPP}_\tau)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \tau=1,2,\cdots \quad (7)$$

若存在 $R/S\infty\tau^H$，表明 *NPP* 时间序列存在 Hurst 现象，称 *H* 值为 Hurst 指数，包括持续性（0.5＜*H*＜1）、随机性（*H*＝0.5）、反持续性（0＜*H*＜0.5）3 种情况。

2.5 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性，以及揭示其背后驱动因素的一种统计学方法（王劲峰和徐成东，2017）。本文选取分异及因子探测器对海河流域 2000—2020 年植被 *NPP* 的影响因素进行分析，基本原理如下：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (8)$$

式中：*h* 为层数；N_h 和 *N* 分别为层 *h* 和研究区的样本数；σ_h 和 σ 分别为层 *h* 和研究区 *NPP* 的方差；*q* 的值域为[0，1]，*q* 值越大表示该因素对海河流域植被 *NPP* 影响力越大，反之则越小。

3 结果与分析

3.1 植被 NPP 时间变化特征

2000—2020 年海河流域 NPP 总量波动范围为 72.02～117.41 Tg C（1 Tg C=10^{12} g C，图 2：A），多年均值为 98.73 Tg C。研究期间植被 NPP 总量呈上升趋势，其中 2020 年 NPP 总量达到最大值，为 117.41 Tg C，2001 年 NPP 总量达到最小值，为 72.02 Tg C。就不同年份 NPP 总量偏离其均值的程度而言，2001 年、2007 年和 2020 年偏离均值的程度较大，NPP 变化显著，而 2005—2006 年、2009—2010 年偏离均值的程度较小，NPP 变化不显著。

将海河流域不同年份的 NPP 均值划分为 6 个区段，对各区段所占面积的百分比进行统计（图 2：B）。由图 2：B 可知，2001 年 NPP 均值最低，为 238.44 g C m^{-2} a^{-1}，2020 年 NPP 均值最高，为 388.54 g C m^{-2} a^{-1}，2000—2020 年 NPP 均值为 326.75 g C m^{-2} a^{-1}。NPP 主要集中于 200～500 g C m^{-2} a^{-1}，面积所占比例在 69.49%～94.74%变化，为海河流域 NPP 均值集中区。

利用 2000—2019 年植被类型数据对 2000—2019 年 NPP 数据进行分区统计，对于缺少的 2020 年植被类型数据，考虑相邻年份差别不大，因此，采用 2019 年植被类型数据对 2020 年 NPP 数据进行统计，得到不同植被类型 NPP 均值年际变化趋势（图 3）。由图 3 可知，不同植被类型的年均 NPP 存在一定的差异性，不同年份 NPP 变化趋势与总趋势（图 2：A）基本一致。不同植被类型多年 NPP 均值排序为阔叶林（385.28 g C m^{-2} a^{-1}）＞灌丛（353.03 g C m^{-2} a^{-1}）＞草地（320.12 g C m^{-2} a^{-1}）＞针叶林（313.59 g C m^{-2} a^{-1}）＞农用地（295.22 g C m^{-2} a^{-1}）。阔叶林、灌丛 NPP 多年均值明显高于全区多年均值（326.75 g C m^{-2} a^{-1}），即为该区固碳、生产力最强的植被。

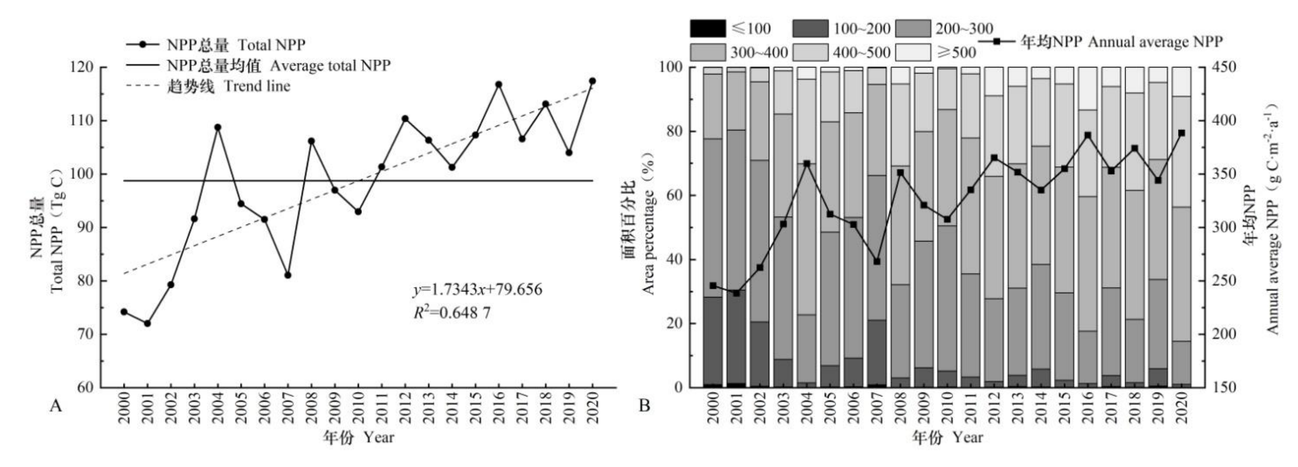


图 2 海河流域 2000—2020 年 NPP 总量和均值年际变化趋势

Fig.2 Interannual variation trend of total and average NPP in the Haihe River Basin during 2000−2020

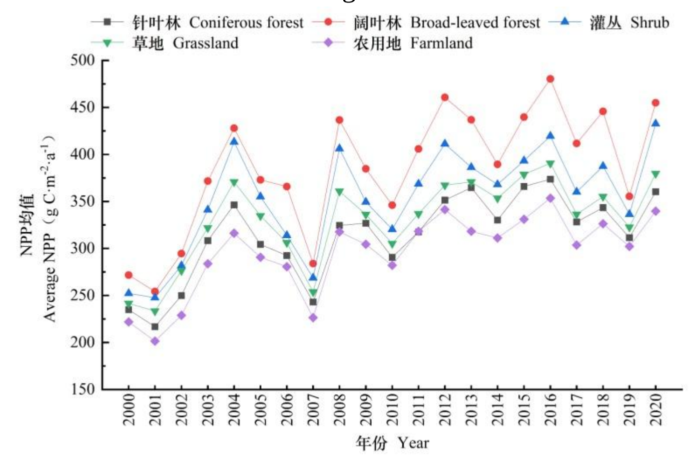


图 3 不同植被类型 NPP 均值年际变化趋势

Fig.3 Interannual variation trend of average NPP of different vegetation types

3.2 植被 NPP 空间变化特征

3.2.1 NPP 年均值及变异系数

海河流域 2000—2020 年不同地区年平均 NPP 波动范围为 29.32～746.84 g C m^{-2} a^{-1}（图 4：A），空间差异性显著，整体呈现西高东低、北高南低的空间格局，高值区主要分布于长治市、晋中市及承德市等地，而低值区主要分布于邯郸市、邢台市及衡水市等地。结合海河流域自然条件、地形地貌及人为活动等因素分析可知，西北部地区主要为太行山脉、燕山山脉，植被覆盖度高，植被类型主要为阔叶林和灌丛，受人为影响小，植被长势较好，植被 NPP 值高，东南部地区主要为平原，大多为耕地和城镇区，植被较为稀疏，受人为影响大，植被 NPP 值低。

NPP 变异系数为 0.05～1.80（图 4：B），均值为 0.17，水平相对较低，表明研究期内海河流域植被 NPP 整体处于相对稳定的空间状态，植被生态系统处于良性循环。高值区域主要集中分布在北京市中西部以及承德市西南部，该地区近些年来大规模进行退耕还林还草、封山育林等生态保护建设工程，使得 NPP 波动性相对较大。

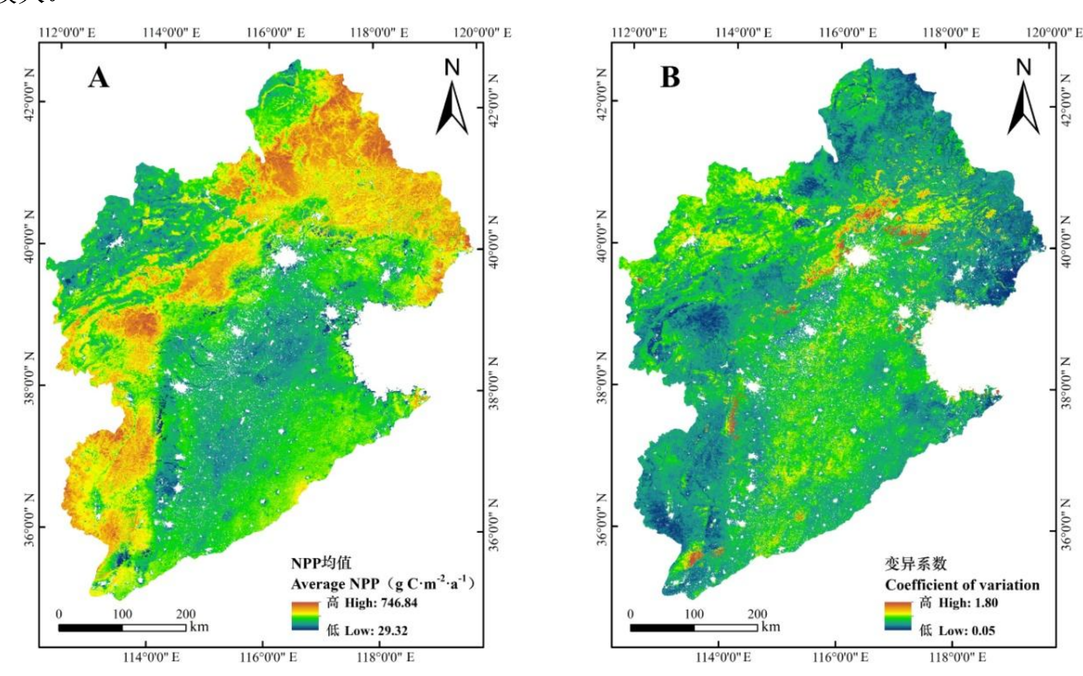


图 4 海河流域 2000—2020 年 NPP 均值和变异系数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of average NPP and coefficient of variation in the Haihe River Basin during 2000−2020

3.2.2 趋势分析

海河流域 2000—2020 年植被 NPP 的 Slope 值为−23.27～30.10（图 5：A），呈增长、减少的占比分别为 97.67%、2.33%，表明研究区 NPP 空间上整体呈现增长趋势，与上述时间上变化趋势结论相同。由图 5：B 可知，该地区植被 NPP 整体变化显著，显著变化面积占比为 71.04%，其中显著增加比例为 70.78%，显著减少比例为 0.26%。就空间分布而言，NPP 极显著减少和显著减少地区位于东部沿海；极显著增加和显著增加地区位于西北部山区；变化不显著地区位于东南部平原。总体而言，海河流域 NPP 呈显著增加趋势，结合研究区自然条件和一些生态保护政策导向可知，西北部海拔高，生态环境脆弱，建议应持续加强该地区生态管控和巩固现有成果，而东南部海拔较低，多为平原，适合开展农业活动和城镇化建设，但考虑到整个海河流域的生态环境情况，应坚持保护优先的发展战略。

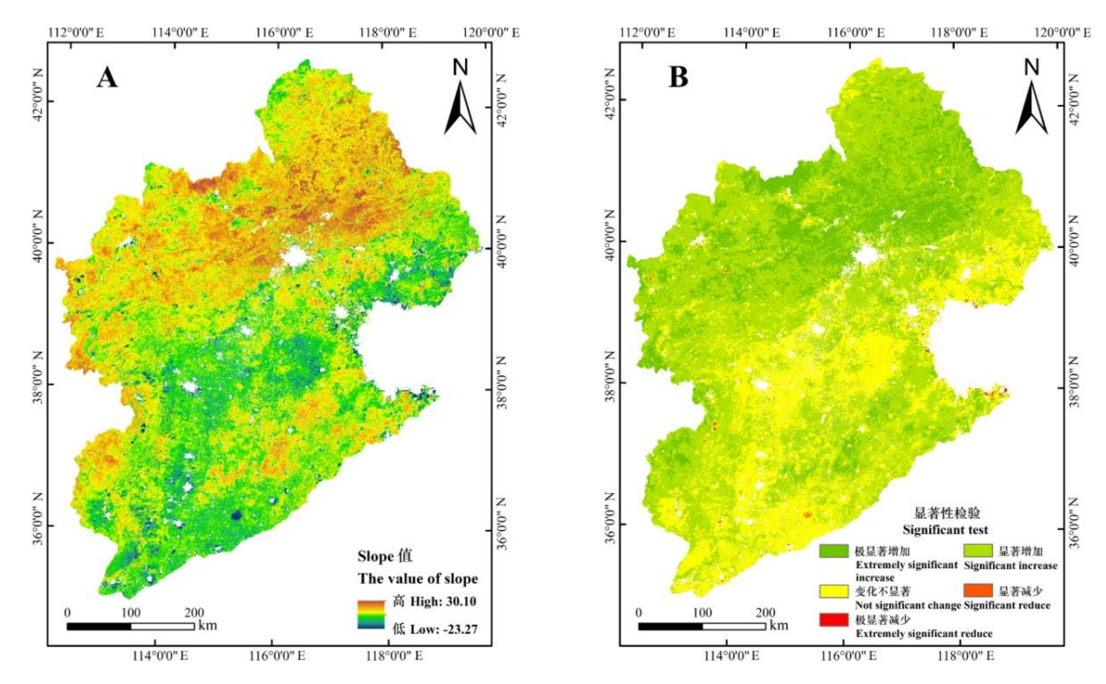


图 5 海河流域 2000—2020 年 NPP 变化趋势和显著性检验结果

Fig.5 NPP variation trend and significance test result in the Haihe River Basin during 2000−2020

3.2.3 NPP 未来变化趋势

通过 Matlab 编程计算得到 Hurst 指数，结果见图 6：A。由图 6：A 可知，海河流域 2000—2020 年 NPP 的 Hurst 指数位于 0.10～0.96，均值为 0.44。将 Hurst 指数结果划分为强反持续（0＜H≤0.25）、弱反持续（0.25＜H＜0.5）、不确定（H=0.5）、弱持续（0.5＜H≤0.75）、强持续（0.75＜H≤0.96）5 个等级，并统计各等级的占比（图 6：B）。由图 6：B 可知，海河流域未来 NPP 反持续性大于不确定和持续性，其中强反持续、弱反持续占比分别为 0.51%、71.39%，说明该区植被 NPP 未来变化趋势整体将呈现反持续性变化，即与过去变化趋势相反。就空间分布来看，强反持续性分布较为零散，弱反持续性主要集中分布于西部山区和承德等地，主要在于西部地区主要为燕山和太行山脉，地势较高，生态环境脆弱，而承德位于坝上草原地区，受人为影响较大，因此未来治理应重点关注该地区，提高其生态系统稳定性。

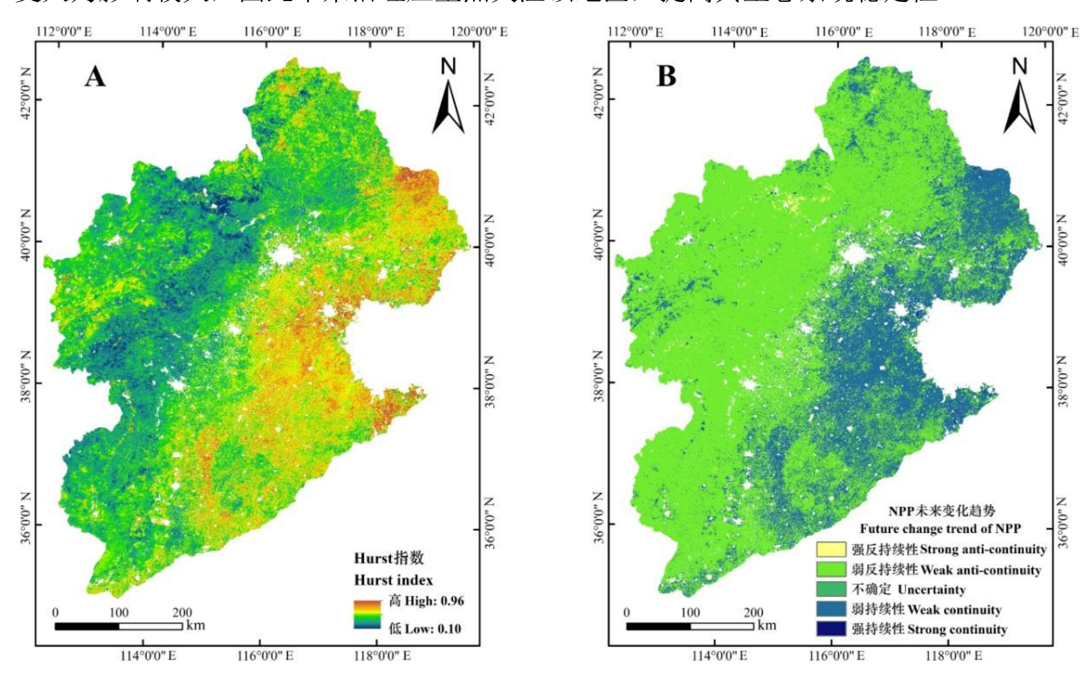


图 6 海河流域 Hurst 指数和 NPP 未来变化趋势

Fig.6 Hurst index and future change trend of NPP in the Haihe River Basin

3.3 植被 NPP 驱动因素分析

3.3.1 NPP 与气象因素的关系

海河流域 2000—2020 年年均气温的变化范围为 10.31～11.72 ℃，多年均值为 11.15 ℃，呈上升趋势；年降水量的变化范围为 367.14～617.35 mm，多年均值为 498.81 mm，呈上升趋势（图 7）。NPP 与气温的相关系数为−0.85～0.80（图 8：A），均值为−0.04，正相关的比例为 42.97%，负相关的比例为 57.03%，表明植被 NPP 与气温整体表现为负相关关系，其中，极显著负相关和不显著负相关面积占比分别为 1.11%、53.46%（图 9：A）。由此得出，植被 NPP 与气温呈不显著负相关关系；NPP 与降水的相关系数为−0.64～0.86（图 8：B），均值为 0.47，正相关的比例为 99.40%，负相关的比例为 0.60%，表明植被 NPP 与降水整体表现为正相关关系，其中，极显著正相关和不显著正相关的面积占比分别为 37.76%、40.16%（图 9：B）。由此得出，植被 NPP 与降水呈不显著正相关关系。就海河流域植被 NPP 与气象因素相关系数均值大小和显著性面积来说，降水均高于气温，表明该地区 NPP 更易受到降水影响，降水是影响 NPP 变化的主要气象因素。

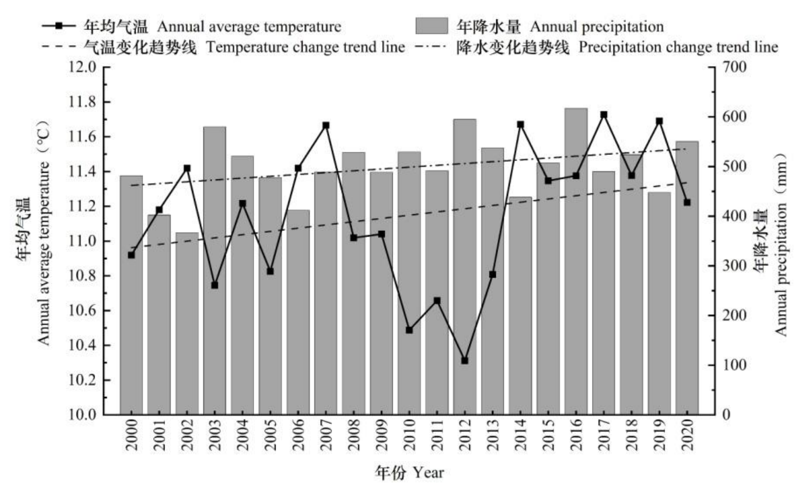


图 7 海河流域 2000—2020 年年均气温和年降水量变化趋势

Fig.7 Trend of annual average temperature and annual precipitation in the Haihe River Basin during 2000−2020

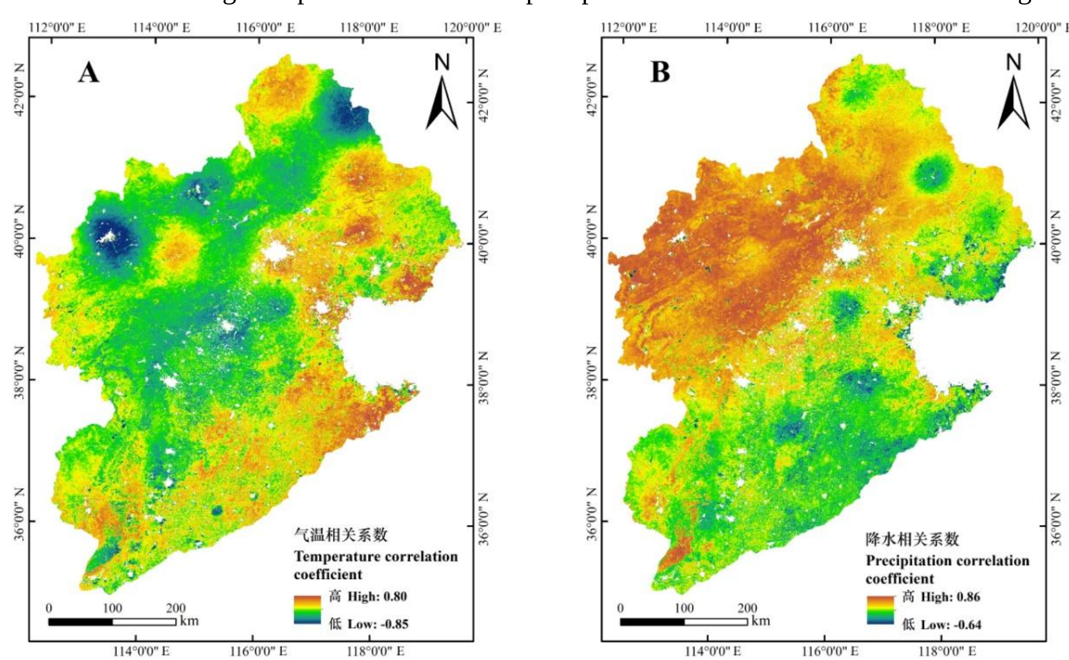


图 8 海河流域植被 NPP 与气象因素相关系数空间分布

Fig.8 Spatial distribution of correlation coefficient between vegetation NPP and climate factors in the Haihe River Basin

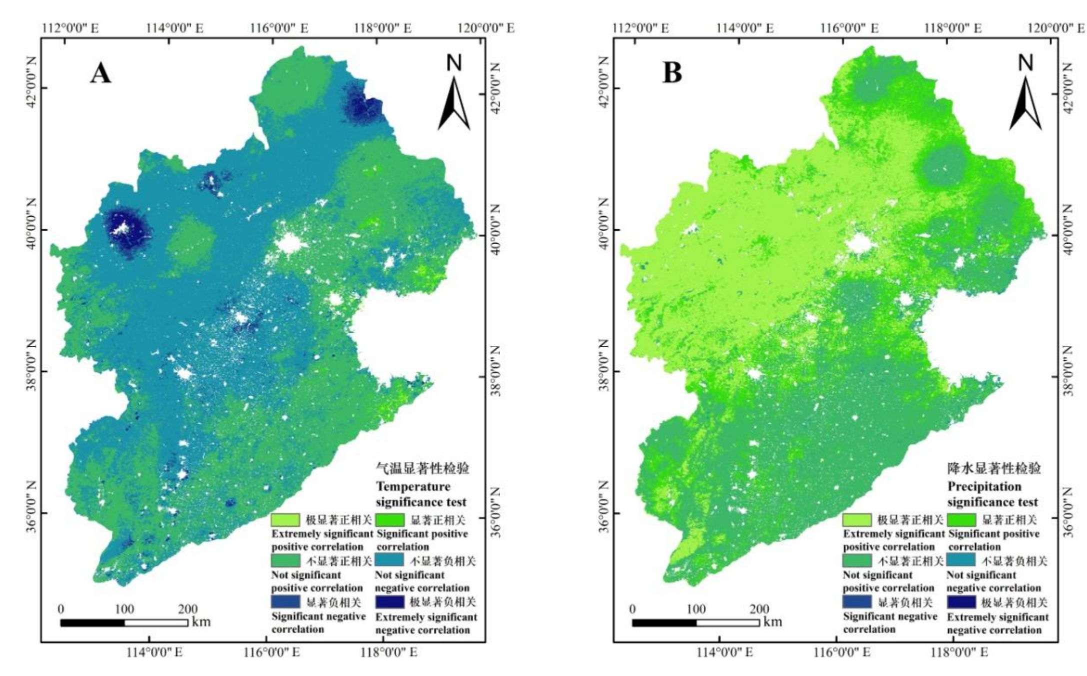


图 9 海河流域植被 NPP 与气象因素相关系数显著性检验结果

Fig.9 Significant test results of correlation coefficient between vegetation NPP and climate factors in the Haihe River Basin

3.3.2 NPP 与地形因素的关系

统计高程、坡度不同分级的 NPP 均值及总量（表 1），由表 1 可知，海河流域以平原、中山为主，高程在 0～1 500 m 占比约为 93.55%，其中，平原所占比例比最大，高山较小。就不同高程等级的植被 NPP 均值而言，存在一定差异，总体变化趋势为随着海拔的升高先增大后减小，具体表现如下：平原地区容易受到城镇化建设、农业耕作等人类活动干扰，植被生产力处于较低水平，但因其面积占比高，NPP 总量较高；植被类型以林地为主的丘陵和低山地带，植被生产力处于较高水平，但因其面积占比低，NPP 总量较低；植被生长环境恶劣且较为稀少的高山地带，植被生产力水平较低，同时由于面积占比小，NPP 总量小。坡度方面，海河流域主要以微坡、斜坡为主，坡度在 0°～15°的面积占比约为 97.94%，其中，微坡所占比例最大，急坡最小。就不同坡度等级的植被 NPP 均值而言，变化趋势与高程一致，为随坡度的增加先增大后减小，具体表现为微坡植被 NPP 总量较高，而当坡度逐渐增加，坡面侵蚀强度逐渐增大，植被生长受到一定的限制，植被覆盖度降低，NPP 总量下降。

表 1 不同高程、坡度分级的植被 NPP

Table 1 Vegetation NPP in different elevation and slope classification

项目 Item	分级 Classification	类型 Type	面积占比 Area proportion (%)	平均 NPP Average NPP（g C m^{-2} a^{-1}）	NPP 总量 Total NPP（×10^{-3} Tg C）
高程 Elevation (m)	≤200	平原 Plain	45.06	283.29	162.24
	200～500	丘陵 Hill	7.79	345.68	34.24
	500～1 000	低山 Low mountain	17.40	368.01	81.41
	1 000～1 500	中山 Middle mountain	23.29	349.92	103.59
	＞1 500	高山 High mountain	6.45	325.22	25.45
坡度 Slope (°)	≤2	微坡 Micro slope	56.88	291.44	209.54
	2～5	缓坡 Gentle slope	18.47	351.36	82.03
	5～15	斜坡 Oblique slope	22.59	383.17	109.43
	15～25	陡坡 Steep slope	2.00	382.44	9.66
	＞25	急坡 Urgent slope	0.06	347.02	0.27

3.3.3 NPP 与土地利用变化的关系

将土地利用数据进行叠加分析，得到土地利用变化转移矩阵（表 2）。由表 2 可知，2000—2020 年期间海河流域有 20.48%的土地利用类型(65 076 km^2)发生了变化，具体表现如下：耕地净转出 16 403.25 km^2，

主要转向草地（5 501.5 km^2）和建设用地（18 583.5 km^2）；草地净转出 3 055.25 km^2，主要转向耕地（4 826.25 km^2）和林地（11 823.75 km^2）；林地净转入 2 573 km^2，主要来自耕地（1 906.25 km^2）和草地（11 823.75 km^2）；水域净转入 627.75 km^2，主要来自耕地（2 340.25 km^2）和草地（819 km^2）；建设用地净转入 15 868.5 km^2，主要来自耕地（18 583.5 km^2）和草地（1 240 km^2）。总得来说，2000—2020 年期间，海河流域土地利用变化表现为耕地、草地的转出以及林地、水域、建设用地和未利用土地的转入。

表 2 2000—2020 年海河流域土地利用变化转移矩阵（单位：km^2）

Table 2 Transfer matrix of land use change in the Haihe River Basin during 2000−2020（Unit: km^2）

年份 Year	类型 Type	耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用土地 Unused land
2000—2010	耕地 Farmland	166 912.00	352.25	1 742.50	778.25	2 396.75	4.25
	林地 Forest	483.75	55 848.75	3 604.00	59.25	26.50	0.25
	草地 Grassland	2 175.50	2 591.00	50 734.00	127.00	82.50	35.00
	水域 Water area	1 201.75	6.50	145.75	3 468.75	55.25	0.50
	建设用地 Construction land	5 119.00	63.50	562.00	130.50	18 834.25	1.50
	未利用土地 Unused land	8.25	0	27.50	7.25	0	153.75
	转出 Transfer out	8 988.25	3 013.50	6 081.75	1 102.25	2 561.00	41.50
	转入 Transfer in	5 274.00	4 173.75	5 011.00	1 409.75	5 876.50	43.00
	净转出 Net transfer out	3 714.25	−1 160.25	1 070.75	−307.50	−3 315.50	−1.50
2010—2020	耕地 Farmland	152 737.25	966.00	3 083.75	912.25	1 786.75	11.00
	林地 Forest	1 422.50	51 931.25	8 219.75	9.25	32.25	0.25
	草地 Grassland	3 326.00	6786.75	43 335.75	114.00	120.50	77.25
	水域 Water area	1 138.50	80.00	257.00	3 657.00	58.50	8.25
	建设用地 Construction land	13 464.50	231.75	678.00	181.50	22 698.75	8.75
	未利用土地 Unused land	97.25	26.75	170.50	5.00	13.50	91.25
	转出 Transfer out	19 448.75	8 091.25	12 409.00	1 222.00	2 011.50	105.50
	转入 Transfer in	6 759.75	9 684.00	10 424.50	1 542.25	14 564.50	313.00
	净转出 Net transfer out	12 689.00	−1 592.75	1 984.50	−320.25	−12 553.00	−207.50

将不同土地利用类型转移量乘以单位面积 NPP 变化量，得到植被 NPP 变化转移矩阵（表 3）。由表 3 可知，2000—2020 年期间，海河流域耕地转为草地造成的 NPP 增量和转为建设用地造成的 NPP 减量分别为 732.22×10^{-3}、294.65×10^{-3} Tg C；草地转为耕地和林地造成的 NPP 增量分别为 62.94×10^{-3}、47.18×10^{-3} Tg C；耕地和草地转为林地造成的 NPP 增量分别为 317.69×10^{-3}、47.18×10^{-3} Tg C；耕地和草地转为水域造成的 NPP 减量分别为 292.59×10^{-3}、75.08×10^{-3} Tg C；耕地和草地转为建设用地造成的减量分别为 294.65×10^{-3}、92.95×10^{-3} Tg C。耕地转为草地导致的 NPP 变化量（732.22×10^{-3} Tg C）高于其他转换方式带来的 NPP 变化量，由此得出，耕地转为草地是海河流域土地利用类型变化引起 NPP 变化的主要地类转换，该转换方式在一定程度上促进了研究区 NPP 增加。

表 3 2000—2020 年海河流域 NPP 变化转移矩阵（单位：$\times10^{-3}$ Tg C）

Table 3 Transfer matrix of NPP change in the Haihe River Basin during 2000−2020（Unit: $\times10^{-3}$ Tg C）

年份 Year	类型 Type	耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用土地 Unused land
2000—2010	耕地 Farmland	—	−4.40	16.05	134.06	79.34	0.27
	林地 Forest	66.41	—	21.21	14.94	5.21	0.04
	草地 Grassland	264.00	133.42	—	30.00	14.89	4.48
	水域 Water area	−138.09	−1.20	−23.76	—	−3.08	−0.05
	建设用地 Construction land	−128.89	−6.03	−41.21	11.71	—	−0.03
	未利用土地 Unused land	0.30	0	−0.31	1.10	0	—
2010—2020	耕地 Farmland	—	−0.69	46.89	229.40	88.98	1.10
	林地 Forest	251.28	—	25.97	3.23	8.36	0.05
	草地 Grassland	468.22	413.04	—	35.69	26.91	12.46
	水域 Water area	−154.50	−17.25	−51.32	—	−3.11	−0.95

建设用地 Construction land	−165.76	−21.37	−51.74	29.03	—	0.07
未利用土地 Unused land	3.42	−1.20	−4.91	1.04	1.59	—

注：—表示该方式下不转换。

Note: — indicates no conversion in this mode.

3.3.4 驱动因素影响力分析

植被 NPP 的时空分异性是多种因素综合作用的结果。基于上述研究结果分析，从自然因素和人为因素两个方面，选取高程、坡度、降水、气温、湿度、风速、日照时数和土地利用共 8 个因素，利用生成的 31 023 个 3 km×3 km 等间距网格点（采样点）分别提取 NPP 数据和不同驱动因素数据的信息，采用分异及因子探测器对海河流域 2000 年、2010 年、2020 年植被 NPP 进行单因素影响力探测，结果见图 10。就得到的驱动因素 q 值来说，值越大表示该因素对 NPP 的影响力越大，则认为其为该年 NPP 空间分异的主导因素。由图 10 可知，海河流域植被 NPP 不同年份的 q 值大小排序依次为降水（0.252）、坡度（0.228）、高程（0.235），说明研究区没有绝对的主导因素。不同年份不同因素的 q 值存在明显差异性，其中波动性最大为降水，该现象在一定程度上体现了研究区区域降水的不均匀性。不同因素 3 个年份 q 值均值大小排序依次为降水（0.215）＞高程（0.212）＞坡度（0.209）＞湿度（0.198）＞气温（0.194）＞日照时数（0.192）＞土地利用（0.190）＞风速（0.185），就 q 值每年均值与多年均值（0.20）关系来说，可将海河流域 NPP 变化影响因素划分为主导因素和重要因素两种类型，即降水、高程和坡度是主导因素，而湿度、气温、风速、日照时数和土地利用则是重要因素。

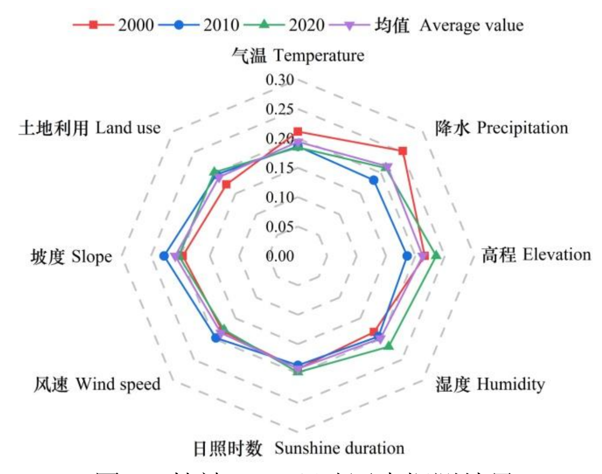


图 10 植被 NPP 驱动因素探测结果

Fig.10 Detection results of vegetation NPP driving factors

4 讨论与结论

近年来，由于气候变化及人类活动的影响，海河流域面临着水土流失、水资源短缺等生态压力。本研究表明，时间上，2000—2020年海河流域植被NPP整体呈增加趋势，主要得益于退耕还林还草、封山育林政策的实施以及一些生态工程的建设，如京津冀防风固沙工程、平原绿化工程等，在一定程度上促进了海河流域植被恢复，生态环境得到一定程度改善（杨艳丽，2017）。空间上，NPP均值呈现由西北向东南递减的趋势，主要在于西北部山区植被以林地为主，而东南部平原地区则多为耕地。另外，不同植被类型年均NPP存在一定的差异，阔叶林、灌丛为研究区固碳、生产力最强的植被，这与李肖等（2018）研究结果一致，同时也应注意到由于研究时段、数据来源等不同，与潘竟虎和文岩（2015）研究结果存在一定的差异。

就影响因素而言，本研究表明气候变化、地形条件以及人类活动共同影响着海河流域植被NPP的变化。气温、降水的增加在一定程度上促进植被生长，但激烈的气候变化也会对植被生长产生抑制作用，进而影响植被NPP的积累，如气温过高会导致植物气孔关闭，从而影响植被的光合作用。研究期内，海河流域气温和降水呈逐步上升趋势，植被生长环境比较适宜，进而促进了研究区NPP增加。由于研究区地势高差大，不同高程范围内植被NPP存在一定差异，整体呈现先增后减的趋势，500～1 000 m处NPP值最高，主要在于该范围内受人类活动影响较小，水热条件优越，植被多为碳吸收能力较强的林地。除上述因素外，人类活动也会对区域植被NPP的积累产生影响，最显著的为土地利用的改变，2000—2020年期间，研究区建设用地面积增加15 868.5 km^2，造成NPP损失量最大，为387.6×10^{-3} Tg C；与此同时，退耕还草使得NPP增加

了732.22×10^{-3} Tg C；本世纪初期，政府在全面促进社会经济发展的同时，海河流域内植被受到较大影响，造成植被退化，而近年来在国家大力推进生态文明建设的背景下，研究区持续开展生态保护、修复和建设工程，植被得到了很大程度恢复，促进了植被NPP增加。

驱动因素影响力上，降水q值均值最高，表示降水对海河流域植被NPP的时空分异性解释力最强，主要在于海河流域处于半湿润半干旱气候过渡区，降水的增加会促进植被的光合作用，从而使NPP增加。地形因素中，高程解释力大于坡度，主要是高程可直接影响植被类型的空间分布，而坡度则是通过坡面侵蚀强度间接影响植被的生长状况，由此可见，地形往往通过控制水热和土壤条件，影响其他环境变量，进而对区域植被格局产生影响（Mao et al., 2014；潘洪义等，2019），得到的结论与当前研究成果具有较好的一致性（朱利欣和袁金国，2019）。虽然过去21年间海河流域土地利用方式变化较为剧烈，但其类型并未发生较大改变，仍主要为耕地、林地和草地，相比于气象和地形因素，对植被NPP产生的影响不大。

未来海河流域生态保护与建设工作应重点考虑降水、地形以及人类活动等方面的影响，如多关注低海拔地区植被修复，合理分配水资源，持续推进退耕还林还草、封山育林等政策和生态修复治理工程，同时需从多角度、多维度持续加大生态保护力度。另外，需要指出的是，在人为因素对区域植被NPP影响方面，目前仅考虑到土地利用类型整体变化，后续研究需定量和细化区分城市扩张、生态建设等人类活动的影响，以降低植被NPP影响因素的不确定性；土壤类型可制约植物能否有效吸收水分，进而影响植被的生长，海河流域土壤类型丰富，不同土壤类型对该区域植被NPP时空分异性的影响有待进一步的探讨。

综上所述，得出如下结论：（1）2000—2020 年期间，海河流域植被 NPP 整体呈显著上升趋势，NPP 总量均值为 98.73 Tg C，年均值为 326.75 g C m^{-2} a^{-1}，阔叶林、灌丛为固碳、生产力最强的植被。（2）空间上，NPP 整体呈现西北部高、东南部低的空间格局。NPP 空间波动性不大，变化趋势呈增长、减少区域占比分别为 97.67%、2.33%。未来变化趋势呈反持续性，NPP 可能下降。（3）植被 NPP 与气温呈不显著负相关关系，与降水呈不显著正相关关系，降水为影响 NPP 变化的主要气象因素。NPP 随着高程和坡度增加均呈“增加-减少”的变化趋势。耕地转为草地一定程度上促进了研究区植被 NPP 增加。（4）驱动因素影响力上，不同驱动因素对 NPP 影响力存在差异，主导因素为降水、高程和坡度，重要因素为湿度、气温、风速、日照时数和土地利用，人为因素影响力低于自然因素。

参考文献：

CHEN ST, GUO B, YANG F, et al., 2020. Spatial and temporal patterns of NPP and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2015[J]. J Nat Resour, 35(10): 2511-2527. [陈舒婷，郭兵，杨飞，等，2020. 2000-2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应[J]. 自然资源学报，35(10)：2511-2527.]

CUI LL, DU HQ, SHI J, et al., 2016. Spatial and temporal pattern of vegetation NPP and its relationship with climate in the southeastern China[J]. Sci Geogr Sin, 36(5): 787-793. [崔林丽，杜华强，史军，等，2016. 中国东南部植被 NPP 的时空格局变化及其与气候的关系研究[J]. 地理科学，36(5)：787-793.]

FIELD CB, BEHRENFELD MJ, RANDERSON JT, et al., 1998. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 281(5374): 237-240.

GE WY, DENG LQ, WANG F, et al., 2021. Quantifying the contributions of human activities and climate change to vegetation net primary productivity dynamics in China from 2001 to 2016[J]. Sci Total Environ, 773: 145648.

LI JK, YANG YT, ZHANG HR, et al., 2019. Spatio-temporal variations of net primary productivity and its natural and human factors analysis in Qinling-Daba Mountains in the past 15 years[J]. Acta Ecol Sin, 39(22): 8504-8515. [李金珂，杨玉婷，张会茹，等，2019. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析[J]. 生态学报，39(22)：8504-8515.]

LI X, YUAN JG, MENG D, 2018. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity and its relationship with climate factors in Hebei Province from 2005 to 2014[J]. Res Soil Water Conserv, 25(6): 109-114. [李肖，袁金国，孟丹，2018. 河北省 2005-2014 年植被 NPP 时空演变及其与气候因子的关系[J]. 水土保持研究，25(6)：109-114.]

LIU J, TANG F, ZHANG GJ, et al., 2021. Spatio-temporal distribution of net primary productivity and its driving

factors in the Luanhe River Basin from 2000 to 2015[J]. Chin J Ecol Agric, 29(4): 659-671. [刘婧，汤峰，张贵军，等，2021. 2000-2015 年滦河流域植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因子分析[J]. 中国生态农业学报（中英文），29(4)：659-671.]

LIU XF, PAN YZ, ZHU XF, et al., 2015. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors[J] J Geogr Sci, 70(5): 705-716. [刘宪锋，潘耀忠，朱秀芳，等，2015. 2000-2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J]. 地理学报，70(5)：705-716.]

LIU ZH, HU MQ, HU YM, et al., 2018. Estimation of net primary productivity of forests by modified CASA models and remotely sensed data[J]. Int J Remote Sens, 39(4): 1092-1116.

LUO Y, ZHANG SL, 2019. Temporal-spatial variation characteristics and driving factors of vegetation NPP in Shandong Province[J]. Guihaia, 39(5): 690-700. [骆艳，张松林，2019. 山东省植被 NPP 时空分布特征及驱动因素分析[J]. 广西植物，39(5)：690-700.]

MAO DH, WANG ZM, WU CS, et al., 2014. Examining forest net primary productivity dynamics and driving dorces in northeastern China during 1982-2010[J]. Chin Geogr Sci, 24(6): 631-646.

MU SJ, LI JL, ZHOU W, et al., 2013. Spatial-temporal distribution of net primary productivity and its relationship with climate factors in Inner Mongolia from 2001 to 2010[J]. Acta Ecol Sin, 33(12): 3752-3764. [穆少杰，李建龙，周伟，等，2013. 2001-2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系[J]. 生态学报，33(12)：3752-3764.]

PAN HY, HUANG P, XU J, 2019. The spatial and temporal pattern evolution of vegetation NPP and its driving forces in middle-lower areas of the Min River based on geographical detector analyses[J]. Acta Ecol Sin, 39(20): 7621-7631. [潘洪义，黄佩，徐婕，2019. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J]. 生态学报，39(20)：7621-7631.]

PAN JH, WEN Y, 2015. Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of northwest China[J] Acta Ecol Sin, 35(23): 7718-7728. [潘竟虎，文岩，2015. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局[J]. 生态学报，35(23)：7718-7728.]

REN HY, WEN ZM, LIU YY, et al., 2021. Spatial-temporal dynamics of grassland net primary productivity and its relationship with hydrothermic factors in northern China[J]. Acta Agr Sin, 29(8): 1779-1792. [任涵玉，温仲明，刘洋洋，等，2021. 我国北方草地净初级生产力时空动态特征及其与水热因子的关系[J]. 草地学报，29(8)：1779-1792.]

SHEN LN, 2018. Vegetation coverage change and its topographic differentiation characteristics in the Haihe River Basin[D]. Tianjin: Tianjin Normal University: 12-13. [申丽娜，2018. 海河流域植被覆盖度变化及其地形分异特征[D].天津：天津师范大学：12-13.]

SUN QL, LI BL, ZHANG T, et al., 2017. An improved Biome-BGC model for estimating net primary productivity of alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecol Model, 350: 55-68.

VENTER ZS, HAWKINS HJ, CRAMER MD, et al.,2021. Mapping soil organic carbon stocks and trends with satellite-driven high resolution maps over South Africa[J]. Sci Total Environ, 771: 145384.

WANG CD, LI WQ, SUN MX, et al., 2021. Exploring the formulation of ecological management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China.[J]. J Environ Manag, 284: 112042.

WANG JF, XU CD, 2017. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geogr Sin, 72(1): 116-134. [王劲峰，徐成东，2017. 地理探测器：原理与展望[J]. 地理学报，72(1)：116-134.]

YANG YL, 2017. Study on the dynamic change of vegetation in Haihe River Basin and its relationship with climate and human activities[D]. Tianjin: Tianjin Normal University: 31-32. [杨艳丽，2017. 海河流域植被动态变化及其与气候、人类活动的关系研究[D]. 天津：天津师范大学：31-32.]

YUAN J, SHEN F, WANG TT, et al., 2016. Impact of land use/cover change on regional net primary productivity in Wanjiang City Belt during the period from 2000 to 2010[J]. Res Soil Water Conserv, 23(5): 245-250. [袁甲，沈非，王甜甜，等，2016. 2000-2010 年皖江城市带土地利用/覆被变化对区域净初级生产力的影响[J].

水土保持研究，23(5)：245-250.]

ZHAO AZ, ZHANG AB, FENG LL, et al., 2019. Spatio-temporal characteristics of water-use efficiency and its relationship with climatic factors in the Haihe River Basin[J]. Acta Ecol Sin, 39(4): 1452-1462. [赵安周，张安兵，冯莉莉，等，2019. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析[J]. 生态学报，39(4)：1452-1462.]

ZHAO WQ, DU HM, DONG YX, et al., 2018. Temporal-spatio characteristics of the vegetation net primary production in the farming-pastoral eco-tone of southern China during 2005-2014[J]. Res Soil Water Conserv, 25(6): 236-241. [赵唯茜，杜华明，董廷旭，等，2018. 2005-2014年南方农牧交错带净初级生产力时空分布特征[J]. 水土保持研究，25(6)：236-241.]

ZHU LX, YUAN JG, 2019. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity and its relationship with topographic factors in Beijing-tianjin-hebei region[J]. Bull Sci Technol, 35(6): 197-203. [朱利欣，袁金国，2019. 京津冀地区植被净初级生产力时空分布及其与地形因子的关系[J]. 科技通报，35(6)：197-203.]

ZHU LY, SUN S, HU K, 2020. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity (NPP) and its impact factors in the Xiliaohe Basin[J]. Guihaia, 40(11): 1563-1574. [朱丽亚，孙爽，胡克，2020. 西辽河流域植被NPP时空分布特征及其影响因素研究[J]. 广西植物，40(11)：1563-1574.]

ZHU WQ, PAN YZ, ZHANG JS, 2007. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Chin J Plant Ecol, 31(3): 413-424. [朱文泉，潘耀忠，张锦水，2007. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报，31(3)：413-424.]